

# “实践”八号卫星高等植物培养箱

张 涛 郑伟波 卢晋人 刘学明 程尔同

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘 要** 介绍“实践”八号科学实验卫星高等植物培养箱的技术特点和空间飞行实验情况,重点是生物实验内容、系统组成,以及显微相机自动调焦算法、培养装置内部环境条件保障、植物花朵柱头成像光路与柔性定位等关键技术应用,并总结空间飞行实验的收获与不足,提出今后的改进方向。

**关键词** 科学实验卫星 微重力 高等植物密闭培养

## 1 概 述

在 2006 年 9 月 9 日发射升空的“实践”八号科学实验卫星上,搭载了由中国科学院上海技术物理研究所研制的高等植物培养箱。该装置专门为我国返回式科学实验卫星研制,实验要求利用该装置在空间微重力条件下实现对高等植物的密闭培养和实时观察,开展空间高等植物的生长发育过程研究,检验相应的培养、观察方法以及装置的各项性能指标。

植物培养箱根据航天仪器的要求和生物学的特点设计,可以为高等植物生长发育提供所需的生命保障功能,同时还能获取空间飞行实验过程中多个目标的实时显微图像和宏观图像,并监控实验过程的关键参数。通过“实践”八号卫星空间飞行实验,实验装置的各项技术性能指标均得到了考核验证,相应的生命科学实验也达到了预期目标,为长期载人航天的生命科学实验技术积累了相关的设计经验。

## 2 植物生成发育过程研究内容和实验方法

### 2.1 研究内容

由于这项空间生命科学实验是在“实践”八号卫星留轨舱内进行的,生物样品不再返回地面,所以,空间飞行实验主要是以分析实时下传的图像和参数为手段开展的。实验装置的研制目标是,在卫星上实时自动获取高等植物在空间环境条件下生长发育过程的连续图像。

高等植物培养实验要求对高等开花植物样本

(青菜)从种子萌发、幼苗生长到开花授粉三个阶段的进行连续观察,同时监测高等植物在密闭系统中的蒸腾作用与水分循环状况。由此研究空间环境条件下高等植物从营养生长到生殖生长过渡的规律,以及开花、授粉等重要生理过程所受的影响;揭示重力条件对高等植物营养生长、花芽分化和生殖器官形成的作用。为研究新一代模块化、集成化,具有基本遥视遥、操作功能的实验系统设计方法,为建立更长期、高效的生命实验系统提供依据。

### 2.2 实验系统组成

实验装置采用自上而下的设计方法。首先根据对实验任务的分析制定出目标装置的功能框图(如图 1 所示),以便建立概念性模型。装置的核心是生物样本单元,包括生物活体、密切相关的生存环境以及专用容器(简称培养模块)。与生物样本单元直接接触的是试验执行部件(简称监测模块),包括观察对象的移动定位和照明成像等机构。环境条件保障系统(简称环控模块)包容前两部分内容,实现对诸如气体压力和成分、温湿度以及光照强度等必要环境条件的统一保障。最外层是装置的支撑保护结构

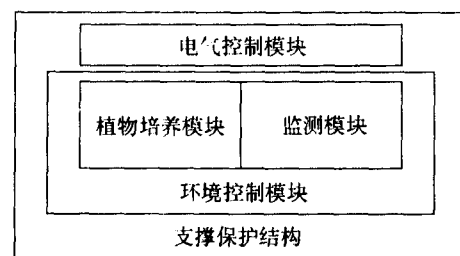


图 1 实验装置功能框图

和无特殊环境条要求件的电气控制模块。

在以往的项目设计中,通常把电气部分作为一台控制器分离出来,这在一定程度上降低了设计难度,方便了光机和电气两部分各自的装配调试。但是增加了设备的总体积和重量,而且控制器和主机之间需要长电缆连接,这对复杂的驱动控制以及大量的数据采集传输是非常不利的。随着电子技术飞速发展,电子器件板卡的集成度大大提高,光机电全面集成化是优化设计方案的必然选择。为了在有限体积下尽量保证开展实验的空间,装置的电气部分设计成扁平板状的电控盒,用来替换装置的一块外壳盖板,直接固定在安装基板上。电控盒盖板向外打开,所有电路均可直接测量调试。电路板平推插入的安装方式配合标准支柱多点固定,在便于备份电路板更换的同时又能保证结构牢固可靠。发热量较大的功率器件通过导热绝缘层直接安装在电控盒朝里一侧,既能保证散热效率又避免了器件暴露在装置外部。电控盒与耐压箱体间通过短电缆和密封接插件连接,便于电控盒与主机分离单独电装调试。

外部结构和电气部分关系到与整星之间的接口协调,必须先行设计。经过对实验装置各组成部分进行反复组合与估算,以及与生物学家和卫星总体两方面的技术协调,最终确定了装置在尺寸重量、安装方向、机械及电气等方面的关键接口参数。实验装置内部结构如图 2 所示。

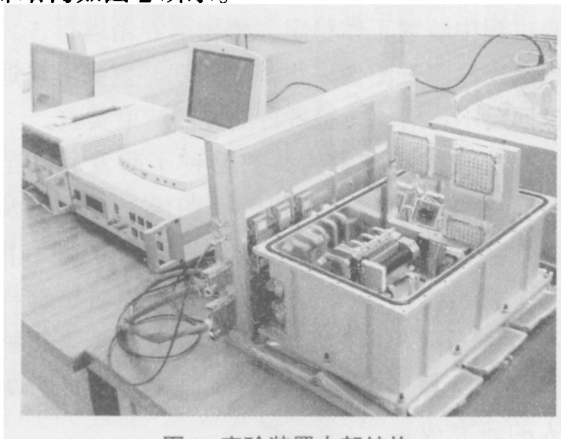


图 2 实验装置内部结构

## 2.3 实验的关键技术

### 2.3.1 显微相机及自动调焦算法

显微相机设计相对独立,单与电气部分配合密切,这是获得图像数据的最主要渠道。由于观察对象在生长过程中会缓慢变化和移动,其动态范围远大于相应倍数显微物镜的景深,因此显微相机必须具

备在一定范围内自动搜索调焦的能力。自动调焦显微相机可分为执行和控制两部分。执行部分是光机系统,提供一定倍数和分辨率的图像信号以及一定行程和精度的调焦移动能力。控制部分是电子系统,读取图像信号并根据一定算法控制镜头移动到使目标清晰成像的位置。

执行部分的关键是精密运动机构,设计中采用直线导轨支承、步进电机驱动、减速微位移传动的运动方案。直线导轨具有运动阻力小、线性度好且承载能力高的特点,能保证一定重量的光学系统稳定顺畅地平移调焦;减速微位移传动机构兼具运动形式变换和减速功能,预紧后没有回程误差,能保证机构简洁和调焦精度;步进电机的控制简单、角分辨率高且定位准确,配合预紧的减速微位移传动机构能实现微米级的位移分辨率和重复定位精度,同时具备厘米级的行程范围。在以上方案的基础上加入显微物镜和微型 CCD 相机后构成了光机系统。该系统具有 1 微米位移分辨率和 2cm 行程,配合不同镜头可实现 0.5×~40×光学放大倍率,总质量不超过 1.5kg。通过鉴定级振动试验和模拟目标调焦成像试验,证明其可靠性和成像质量均符合要求。

控制部分的关键是调焦算法,设计中采用基于数字图像清晰度评价函数的算法,实现的硬件基础是高速数字信号处理器。调焦时通过全行程范围的预扫描,计算不同位置处的图像清晰度评价值,最后确定评价值最佳的位置。该方案的优点在于调焦过程的智能化,可以针对不同目标特性来调整评价函数,从而排除干扰物的影响,在复杂环境中分辨出真正的目标。通过模拟实际目标状态的调焦试验,控制部分的算法得到不断的优化调整,调焦准确率和图像清晰度均能满足实验观察的需求。

### 2.3.2 内部环境保障

由于卫星留轨舱只保证 1/2 大气压且温度变化范围很大,因此具有绝热和耐压特性的箱体是装置整体结构的特点。在吸取以前多种设计方案优点的基础上,最终采用了夹层结构。内层是气密耐压箱体,其上包裹适用于地面环境的绝热材料和适用于空间环境的多层包扎材料,在地面和空间两种条件下均可以实现良好的绝热效果;外层由安装基板和五块盖板组成,既能保护内部材料又加强了绝热效果。气密耐压箱体由绝热支撑结构固定在安装基板

上,同时将半导体致冷器置于两者之间。由于安装基板与卫星结构有良好的热接触,通过半导体致冷器的双向工作即可实现内层的双向主动温控。在这种气压恒定、温度可控的内部环境条件下,植物培养模块自成封闭系统,可以满足植物培养的环境保障需求;同时还为植物培养模块提供符合植物生长要求的光照、水分和空气成分条件。

### (1)光照条件控制

由于卫星能源、安全性和尺寸重量等限制,实验装置中无法使用汞灯、荧光灯和白炽灯等传统光源,设计中选用了尺寸小、光效高、组合灵活、安全可靠的新型半导体光源。通过多次地基高等植物培养试验,对半导体光源阵列的数量、位置和配色方案进行调整和优化,以满足高等植物在各生长阶段对光照强度和光谱的需要。同时对光源产生的热量采取均匀化处理,迅速把热传导给整个内部箱体,避免局部高温影响植物的生长发育。

### (2)气体组份调节

植物在昼夜循环中能自行平衡空气中氧气和二氧化碳的含量。但是植物生长中产生的乙烯气体却对自身生长有抑制作用,设计中采用专用气体吸附剂来去除乙烯。

### (3)冷凝水控制

由于植物的蒸腾作用,培养基中的水分逐渐进入空气中直到饱和,相对湿度会维持在接近 100%。样本植物是生长在靠近热带的一种青菜,饱和湿度对其生长并没有不利影响。但是当光照条件模拟昼夜交替变化时会产生温度波动和不均匀,水气会在温度低的表面冷凝成液态水。冷凝水无法回到培养基而是逐渐积累,这对内部的电气安全带来隐患。设计中一方面做好电气部分的内部防水处理,另一方面在容易出现冷凝水的部位布置了一定剂量的高分子吸水材料,以减少冷凝水的聚集。

#### 2.3.3 花朵柱头成像光路与柔性定位

为了清楚地记录植物开花过程中柱头和花药的状态,相机必须从花朵正上方观察。通过多次成像试验确定微型物镜的光学倍率为  $0.5\times$ 、工作距离为 150mm。在实验装置最大尺寸有限的情况下,采用光路折叠的设计方法,在保证光学视场不受损失的前提下,将光路进行两次直角反射,以满足物镜工作距 150mm 的要求;同时在靠近花朵的一端设计了减少

杂散光的光阑以及同轴的夜间成像光源。采用这种设计方法,有效解决了植株、物镜工作距和相机同轴安装时三者长度之和超过实验装置最大尺寸的问题,使植株和相机并列布置,合理地利用了有限的实验空间。样本植物从安装就位到开始开花期间,花苔会随着植株自身生长而不断长高 3~5cm,花柄也会变长 1cm 左右,因此花朵最终的位置无法准确预测。由于相机的光学视场和机械行程都不允许花朵生长过程中有太大的移动,直接固定幼嫩的花蕾会影响其顺利开花,因此设法定位花苔是最可行的办法。通过反复试验研究,最终采用一个填充了柔软保护材料的网状固定结构对花苔柔性限位方法。随着植物生长,其茎部会逐渐弯曲盘旋而花苔位置不变,花蕾从网眼中钻出来,也仅会在轴向长高几个毫米,水平位置基本不变,柔性结构可以防止花苔和花蕾在生长过程中受到物理损伤。这样,在不损伤样本植物的同时,可以保证相机能顺利捕捉到花朵开放全过程的完整图像。

## 3 实验结果

2006 年 9 月 9 日“实践”八号卫星成功发射,1h 后植物培养箱接收指令开始工作。装置内部照明开始模拟 24h 昼夜交替,观察相机每 2h 获取两幅花朵特写图像和一幅全景图像,数据采集系统每 10min 获取一组实验参数。所有实验数据均由卫星存储并过境下传,接收到的图像清晰、参数完整。整个飞行实验过程中装置工作稳定,植物培养箱运行 5 天后按预定程序降低图像采集传输频度,直到卫星返回舱返回后不再对留轨舱进行测控而结束实验。

此次飞行实验中,共获得种子萌发和幼苗生长全景图像 108 幅、开花特写图像 216 幅以及完整的实验监测参数。空间实验图像如图 3 和图 4 所示。初步判读结果表明微重力环境对植物样品均产生了不同程度的影响,目前生物学家正就这些图像和参数做进一步分析对比,有望取得更加深入的研究成果。

## 4 分析讨论

植物培养箱在“实践”八号上的成功,证明了其中所运用的光机电技术和各功能模块的可行性和可靠性。自动调焦显微相机、小型花朵柔性定位等技术

(下转第 35 页)

也把值班员从烦琐频谱监视中解放出来, 有很大的现实意义。◇

### 参 考 文 献

- [1]丁玉美等编著. 数字信号处理——时域离散随机信号处理. 西安电子科技大学. 2002  
[2]胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出

版社, 1997

- [3]Uwe Meyer-Baese 著. 数字信号处理的 FPGA 实现. 清华大学出版社, 2002  
[4]维纳·K·恩格尔等著. 数字信号处理——使用 Matlab. 西安交通大学出版社, 2001  
[5]K.J. Ray Liu. Novel Parallel Architectures for Short-Time Fourier Transform [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 40, No. Dec. 1993: 786-789

(上接第 6 页)

手段, 在中国空间生命科学实验中都是首次运用, 为今后空间生命科学研究提供了新的实验手段。

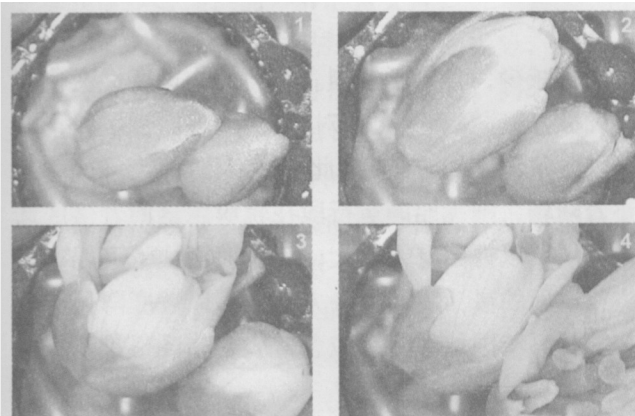


图 3 高等植物空间开花图像

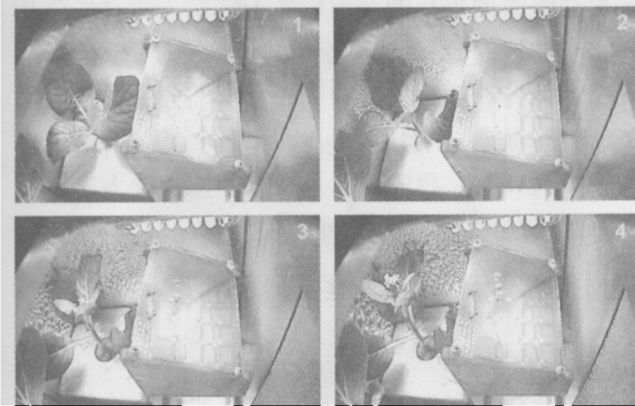


图 4 高等植物空间生长发芽图像

本实验装置仍存在可以进一步改进的空间, 例如简化更换培养模块的复杂性、植物培养箱内部水循环控制、获取射前保温期间样品的实时图像等等。这些改进措施需要从卫星平台技术和资源状态、实验装置设计研制、生物学匹配实验等几个方面协同开展。本次实验装置的研制和空间飞行实验的成功实施, 为今后模块化、标准化和集成化的空间生命科学实验装置研制奠定了重要的技术基础。◇

### 参 考 文 献

- [1]王存恩. SFU 在轨应用成果分析. 中国航天, 1998, 12.  
[2]空间科学学报(空间生命科学专集). 1999, 19(增刊).  
[3]江丕栋主编. 空间生物学. 青岛出版社.  
[4]刘存德. 空间生物学研究. 王大珩, 潘厚任总主编. 太空·地球·人类. 广西科学技术出版社.  
[5]张涛. 空间生命科学实验设备与技术研究. 载人航天, 2004, 4.  
[6]吴世法. 近代成像技术与图像处理. 国防工业出版社, 1997.  
[7]周祖成. 电荷耦合器件在信号处理图像传感中的应用. 清华大学出版社. 1991.  
[8]刘承宪. 空间生物学与空间生物技术研究进展. 空间科学学报. 1999.  
[9]苏光大. 图像并行处理技术. 清华大学出版社. 2002.  
[10]徐志军. 大规模可编程逻辑器件及其应用. 电子科技大学出版社. 2000.  
[11]蔡伟明, 赵炜. 模拟微重力对人参细胞生长和人参皂甙含量的影响. 植物生理学报. 1998.